

## การวิเคราะห์ผลจากความสบายเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกด้วยการทดลอง Experimental analysis for the thermal comfort effect from the glass windows

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์<sup>1</sup> และ นพรัตน์ คำพร<sup>2</sup>\*

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ. พญาไท กรุงเทพฯ 10330

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ถ. เพชรเกษม กรุงเทพฯ 10160

\* ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 2186610, โทรสาร: (662) 2522889,

E-mail: <sup>1</sup>somsak.c@eng.chula.ac.th, <sup>2</sup>afluid98@hotmail.com

### บทคัดย่อ

ในบทความนี้จะกล่าวถึงการศึกษาศมรรถนะเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกใสและกระจกสีในแง่ของความสบายเชิงความร้อนด้วยวิธีการทดลอง การทดลองถูกกระทำขึ้นในห้องทดสอบที่สร้างขึ้น ผนังโดยรอบและเพดานถูกสร้างเป็นผนังสองชั้นเพื่อลดการส่งผ่านความร้อน หน้าต่างกระจกที่ใช้ในการทดลองจะถูกติดตั้งโดยหันหน้าไปทางทิศตะวันตก ในการทดลองจะทำการวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกระจก รังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านกระจก อุณหภูมิผิวกระจกด้านใน และด้านนอก อุณหภูมิผนังต่าง ๆ ในห้องทดสอบ อุณหภูมิอากาศด้านใน และด้านนอกของห้องทดสอบ ความเร็วของอากาศ อุณหภูมิ operative จากนั้นจะนำเอาข้อมูลที่วัดได้ไปประมวลและแสดงผลของค่าความสบายเชิงความร้อนในรูปแบบของ Predicted percentage of dissatisfied (PPD) จะพบว่าผลของความสบายเชิงความร้อนที่มีต่อผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกนั้นจะขึ้นกับคุณสมบัติเชิงแสงของหน้าต่างกระจก โดยเฉพาะค่าการส่งผ่านรังสีและค่าการดูดกลืนรังสี และยังพบว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของห้องที่ผู้อยู่อาศัยรับรู้จะมีผลต่อค่าความสบายเชิงความร้อนเป็นอย่างมาก หน้าต่างกระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสีสูงจะให้ค่าความไม่สบายเชิงความร้อนที่เกิดจากผลของการรับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรงเป็นหลัก ในขณะที่หน้าต่างกระจกที่มีค่าการดูดกลืนรังสีสูงนั้นค่าความไม่สบายเชิงความร้อนที่เกิดจากผลของการแผ่รังสีคลื่นยาวจากอุณหภูมิผิวกระจกจะมีความสำคัญมากขึ้น

**คำหลัก:** หน้าต่างกระจก สมรรถนะเชิงความร้อน ความสบายเชิงความร้อน การทดลอง

### Abstract

This article is about the study of thermal performance of a clear glass window and a grey glass window in respect of thermal comfort by experiment. The experiment is performed in the testing chamber. The chamber is constructed with double walls and double ceiling to minimize the heat loss. The tested glass window is installed in the chamber wall facing in west direction. The incident solar radiation, transmitted solar radiation, outside and inside glass surface temperature, inside walls and ceiling temperature, inside and outside air temperature, air velocity and operative temperature are measured during the experiment. The measured data are processed and evaluated for the thermal comfort condition

in the form of predicted percentage of dissatisfied (PPD). It is found that the thermal comfort effect on people who sit near the glass window is dependent on the optical properties of the glass window. The mean radiant temperature that people in the room sensed has major effect on the thermal comfort condition. The majority of the discomfort from the high transmittance glass window shall come from the solar radiation effect. For the high absorptance glass window, the discomfort due to the longwave effect from glass surface temperature becomes more important.

**Keywords:** Glass window, Thermal performance, Thermal comfort, Experiment.

## 1. บทนำ

ในอาคารขนาดใหญ่และอาคารพาณิชย์ทั่วไป มักมีหน้าต่างกระจกจำนวนมากเป็นส่วนหนึ่งของ กรอบอาคาร หน้าต่างกระจกมีประโยชน์หลายอย่าง เช่น ช่วยให้ผู้อยู่อาศัยสามารถเห็นทิวทัศน์ภายนอก ช่วยนำแสงสว่างจากธรรมชาติเข้าสู่ห้องทำให้สามารถ ลดการใช้แสงสว่างจากไฟฟ้า และยังสามารถใช้เป็น ส่วนตกแต่งภายนอกอาคารที่ทำให้อาคารมีความ สวยงามมากขึ้น เป็นต้น แต่ในขณะเดียวกันหน้าต่าง กระจกก็ยังเป็นส่วนของอาคารที่ทำให้เกิดการส่งผ่าน ความร้อนจำนวนมากเข้าสู่ภายในอาคาร ทำให้ต้องมี การติดตั้งระบบปรับอากาศในการกำจัดความร้อนที่ถูก ส่งผ่านหน้าต่างกระจกออกไปเพื่อรักษาสภาวะภายใน ห้องให้มีความสบายเชิงความร้อนสำหรับผู้อยู่อาศัย ความเข้าใจในสมรรถนะเชิงความร้อนของหน้าต่าง กระจกถือว่าเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบอาคาร ที่ใส่ใจเกี่ยวกับการอนุรักษ์พลังงาน Chaiyapinunt et al. [1] Chaiyapinunt and Khamporn [2] ได้ ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะเชิงความร้อนของ หน้าต่างกระจกและหน้าต่างกระจกชนิดต่าง ๆ โดยใช้ การวิเคราะห์ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นหลัก ในบทความนี้จะกล่าวถึงการศึกษสมรรถนะเชิงความ ร้อนของหน้าต่างกระจกโดยใช้การทดลอง

## 2. ความสบายเชิงความร้อน และดัชนีที่เกี่ยวข้อง

ความรู้สึกรู้สึกสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort) เป็นสภาวะที่ผู้อยู่อาศัยมีความพอใจใน ลักษณะความร้อนรอบตัว [3] Fanger [4] ได้ กำหนดสมการที่ใช้แสดงค่าความสบายเชิงความร้อน

ของคนซึ่งขึ้นกับค่าตัวแปร 6 ตัว คือ ค่าอุณหภูมิ ค่า ความเร็วลม ค่าความชื้น ค่าการผลิตพลังงานใน ร่างกาย ลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่ และค่าอุณหภูมิ การแผ่รังสีเฉลี่ย (mean radiant temperature (MRT)) และได้กำหนดค่าดัชนีความสบายไว้ 2 ค่า คือ ค่า Predicted mean vote (PMV) และค่า Predicted percentage of dissatisfied (PPD) ซึ่งสามารถเขียน ได้เป็นสมการดังนี้

$$PMV = (0.3033e^{-0.036 \cdot met} + 0.028) \cdot [met - 0.35 \cdot (5.73 - 0.00699 \cdot met - P_a) - 0.42 \cdot (met - 58.15) - 0.0173 \cdot met \cdot (5.867 - P_a) - 0.0014 \cdot met \cdot (34 - T_a) - 3.96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot (T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a) \quad (1)$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)} \quad (2)$$

เมื่อ  $met$  = อัตราการผลิตพลังงานภายในร่างกาย เนื่องจากการทำกิจกรรม,  $W/m^2$

$P_a$  = Partial Pressure ของไอน้ำ, mm Hg

$f_{cl}$  = อัตราส่วนพื้นที่ของเสื้อผ้าที่สวมใส่ต่อ พื้นที่ผิวร่างกายทั้งหมด

$T_{mrt}$  = ค่า Mean radiant temperature,  $^{\circ}C$

$T_a$  = อุณหภูมิอากาศภายใน,  $^{\circ}C$

$T_{cl}$  = อุณหภูมิเสื้อผ้าที่สวมใส่,  $^{\circ}C$

$h_c$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่าง อากาศและเสื้อผ้า,  $W/m^2 \cdot K$

ค่า Predicted mean vote (PMV) จะเป็น ค่าที่ได้จากผลการลงความเห็นของคนกลุ่มใหญ่โดยได้ แบ่งเป็นค่าอยู่ 7 ระดับของความพอใจ ซึ่งจะอยู่ในช่วง ตั้งแต่ -3 (หนาวมาก) ถึง +3 (ร้อนมาก) และ 0 หมายถึงลักษณะปานกลาง (รู้สึก สบายพอดี) ส่วนค่า Predicted percentage of dissatisfied (PPD) เป็นค่า

เปอร์เซ็นต์ของคนที่ไม่พอใจสถานะที่อาศัยอยู่เป็นค่าตัวเลขจาก 0 ถึง 100 ถ้าค่ามากก็แสดงว่ามีคนจำนวนมากเป็นเปอร์เซ็นต์ตามค่าบ่งว่าสถานะที่อยู่เป็นที่ไม่พอใจ ค่า PPD ประมาณ 10 % จะเป็นค่าที่ยอมรับได้เป็นส่วนใหญ่ว่าค่อนข้างสบายมาก ค่าที่มากกว่านี้ในหลายกรณีก็ยังเป็นที่ยอมรับว่าสบายพอสมควร

ในการศึกษาค่าความไม่สบายของผู้คนที่อาศัยอยู่ใกล้หน้าต่างกระจก Chaiyapinunt et al. [1] พบว่าจะเกิดจากปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือค่าไม่สบายที่เกิดจากการรังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากกระทบผู้คนที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกโดยตรง และค่าความไม่สบายที่เกิดจากอุณหภูมิผิวตัวในของหน้าต่างกระจก ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของ PPD ได้เป็น

$$PPD (total) = PPD(surface temperature) + PPD(solar radiation) \quad (3)$$

เมื่อ

$PPD (total)$  = ค่า PPD รวม

$PPD(surface temperature)$  = ค่า PPD ที่คิดเฉพาะผลจากอุณหภูมิผิว

$PPD(solar radiation)$  = ค่า PPD ที่คิดเฉพาะผลจากรังสีแสงอาทิตย์

ดังนั้นค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (MRT) ซึ่งถูกนิยามเป็นอุณหภูมิสมมติของผิวสมมุติภายในที่ให้การแผ่รังสีความร้อนจากร่างกายคนเท่ากับความร้อนที่แผ่ออกจากสถานะจริง จึงต้องแบ่งเป็นสองส่วนคือ ค่า MRT ที่คิดเฉพาะผลจากอุณหภูมิของผิวกระจกและค่า MRT ที่รวมถึงผลจากอุณหภูมิผิวกระจกและรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านกระจกมากกระทบร่างกายคน

$$T_{smrt} = [(t_{s1} + 273)^4 \cdot F_{p-1} + (t_{s2} + 273)^4 \cdot F_{p-2} + \dots + (t_{sn} + 273)^4 \cdot F_{p-n}]^{0.25} - 273^\circ C \quad (4)$$

$$T_{smrt} = \left[ \sum_{i=1}^N F_{p-i} T_i^4 + \frac{a_p}{\varepsilon \sigma} (F_{p-win} I_{diff} + f_p I_{dir}) \right]^{1/4} \quad (5)$$

เมื่อ

$T_{smrt}$  = ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดเฉพาะผลจากอุณหภูมิของผิวกระจก °C

$T_{smrt}$  = ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่รวมถึงผลจากอุณหภูมิผิวกระจกและการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ °C

$t_{sj}$  = ค่าอุณหภูมิผิวของผนังด้านที่  $j$

$F_{p-j}$  = ค่า View factor ระหว่างคนกับผนังด้านที่  $j$

$$\left( \sum_j^n F_{p-j} = 1 \right)$$

$F_{p-win}$  = ค่า View factor ระหว่างคนกับหน้าต่างกระจก (เท่ากับ 0.312 เมื่อระยะห่างจากกระจกเท่ากับ 0.2 ม)

$f_p$  = Projected area factor

$a_p$  = ค่าการดูดกลืนของผิวด้านนอกของมนุษย์ (standard value = 0.6)

$\varepsilon$  = Emittance of the outer surface of the person (standard value = 0.95)

$\sigma$  = Stefan Boltzmann constant,  $W/m^2 \cdot K^4$

$I_{dir}$  = ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง,  $W/m^2$

$I_{diff}$  = ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย,  $W/m^2$

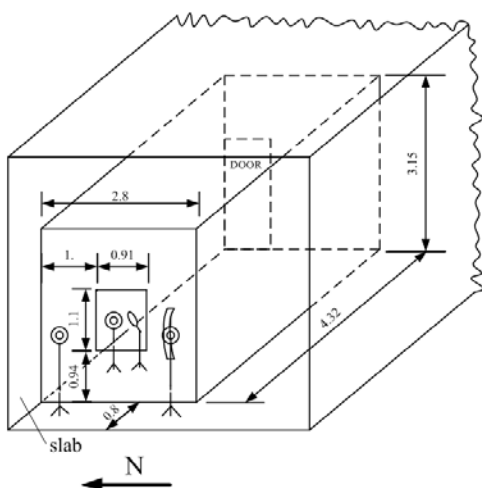
สำหรับการคำนวณค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงและแบบกระจายจากรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านเข้ามาในห้องสามารถทำได้โดยทำการคำนวณค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ที่แปรตามเวลา ทิศ และตำแหน่งที่ตั้งของหน้าต่างกระจกที่พิจารณาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเสนอโดย ASHRAE [5] และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Fuller [6] คำนวณค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบที่ต่างกันเพื่อนำไปใช้กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกในการหาค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ส่งผ่านเข้ามาในห้อง จากนั้นจึงนำไปคำนวณค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ถูกส่งผ่านเข้ามาในห้องจากรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดได้ในห้อง

ในการคำนวณค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนในรูปของ PPD นั้นจะสามารถนำค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่รวมถึงผลจากอุณหภูมิผิวกระจกและรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านกระจกมากกระทบร่างกายคนตามสมการที่ 5 ไปแทนค่าในสมการที่ 1 และ 2 หาค่า PPD รวม ( $PPD(total)$ ) ได้ และในทำนองเดียวกันเมื่อนำค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดเฉพาะผลจาก

อุณหภูมิผิวกระจกตามสมการที่ 4 ไปแทนค่าในสมการที่ 1 และ 2 ก็จะสามารถหาค่า PPD ที่คิดเฉพาะผลจากอุณหภูมิของผิวกระจกเพียงอย่างเดียว

### 3. ห้องทดลองและอุปกรณ์การวัด

ห้องทดลองในการศึกษานี้ถูกสร้างขึ้นที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องมีขนาดหน้ากว้าง (ด้านที่ติดหน้าต่างกระจกและหันออกนอกอาคาร) 2.8 เมตร สูง 3.15 เมตร ยาว 4.32 เมตร ผังสามด้านและเพดานเป็นผนังยิปซัม 2 ชั้นบุด้วยใยแก้วหนา 2 นิ้ว ผนังด้านที่ติดหน้าต่างกระจกนั้น ด้านนอกเป็นผนังอะลูมิเนียม ผนังด้านในเป็นผนังยิปซัมบุด้วยใยแก้วหนา 2 นิ้ว ผนังด้านในและเพดานทาด้วยสีดำ หน้าต่างกระจกที่ทดสอบมีขนาด กว้าง 0.9 เมตร สูง 1.1 เมตร ตัวหน้าต่างกระจกถูกติดไว้ให้ขอบด้านล่างอยู่สูงกว่าพื้นเป็นระยะ 0.94 เมตร อุณหภูมิภายในห้องถูกควบคุมด้วยเครื่องปรับอากาศ ด้วยข้อจำกัดของพื้นที่ในการสร้างห้อง ทำให้หน้าต่างกระจกถูกบังจากขอบอาคารที่อยู่ด้านข้างและด้านบน ตัวหน้าต่างกระจกถูกติดตั้งห่างจากขอบอาคารประมาณ 0.8 เมตร รูปที่ 1 แสดงถึงลักษณะของห้องทดลอง



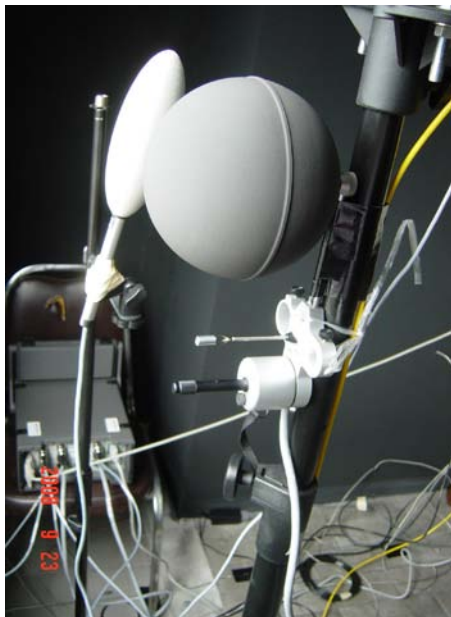
รูปที่ 1 ลักษณะของห้องทดลอง

อุปกรณ์การวัดประกอบด้วยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ (pyranometer) ของบริษัท Kipp&Zonen

รุ่น CM6B จำนวน 3 เครื่อง พร้อมแหวนบังเงา (shading ring) 1 ชุด โดยเครื่องวัด 2 ตัว จะถูกติดตั้งอยู่ภายนอกอาคารบนขาตั้งหันตัวแผ่นรับแสงอาทิตย์ให้อยู่ในแนวตั้งเพื่อวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่ตกกระทบในระนาบแนวตั้ง เครื่องวัดอีกตัวจะถูกติดตั้งบนขาตั้งอยู่ด้านหลังหน้าต่างกระจกประมาณกึ่งกลางกระจกเพื่อวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านกระจกเข้ามาในห้อง อุณหภูมิของผิวหน้าต่างกระจกทั้งด้านนอกและด้านใน รวมทั้งอุณหภูมิผิวของผนังห้องและเพดานทำการวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด J ติดที่ผนังต่าง ๆ สำหรับอุณหภูมิกระจกมีการติดแผ่นบังเงาขนาดเล็กเพื่อลดผลกระทบจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบโดยตรงกับตัวเทอร์โมคัปเปิล ค่าอุณหภูมิที่วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลจะถูกสอบเทียบกับตัวตรวจรู้อุณหภูมิที่มีความละเอียดและแม่นยำ ( มีความแม่นยำ  $\pm 0.5$  °C) ค่าอุณหภูมิของผนังต่าง ๆ และค่ารังสีแสงอาทิตย์ถูกจัดเก็บด้วยเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) ค่าอุณหภูมิอากาศ ความเร็วอากาศและอุณหภูมิ operative ถูกวัดด้วยหัววัดของบริษัท Innova จำกัด สำหรับหัววัดอุณหภูมิ operative จะมีลักษณะเป็นรูปวงรีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มม. ยาว 160 มม. ตัวหัววัดถูกออกแบบให้มีค่าอัตราส่วนของการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีกับการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนเหมือนกับของร่างกายมนุษย์ การเอียงท่ามุมของหัววัดจะจำลองสภาพของมนุษย์ที่อยู่ในตำแหน่งยืน นั่งและนอนได้ รูปที่ 2 และ 3 แสดงถึงเครื่องมือวัดต่าง ๆ



รูปที่ 2 เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจาย



รูปที่ 3 หัววัดอุณหภูมิ operative และเครื่องเก็บข้อมูลและประมวลผลความสบายเชิงความร้อน

นอกจากนั้นในการทดลองยังใช้เครื่องเก็บและประมวลผลข้อมูลเฉพาะของบริษัท Innova จำกัด ซึ่งจะถูกเรียกว่าเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนเพื่อทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ความเร็วอากาศและอุณหภูมิ operative และทำการประมวลผลเป็นค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (mean radiant

temperature) และทำการประมวลผลให้ค่า predicted percentage of dissatisfied (PPD) ความสัมพันธ์ที่เครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนใช้ในการประมวลผลค่าอุณหภูมิ operative มาเป็นค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย [7] จะสามารถเขียนได้เป็น

$$T_{mrt} = [(t_o + 273)^4 + (h_{cg} / \varepsilon \sigma)(t_o - t_a)]^{0.25} - 273^\circ C \quad (6)$$

$$h_{cg} = \max \text{ of } \begin{cases} 18 \times v_a^{0.55} & \text{Forced convection} \\ 3 \times (|t_o - t_a|)^{0.25} & \text{Free convection} \end{cases} \quad (7)$$

เมื่อ  $T_{mrt}$  = อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย °C

$t_o$  = อุณหภูมิ operative °C

$t_a$  = อุณหภูมิอากาศ °C

$\varepsilon$  = Emittance of the outer surface of the person (standard value = 0.95)

$\sigma$  = Stefan Boltzmann constant,  $W/m^2 \cdot K^4$

#### 4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การทดลองกระทำกับหน้าต่างกระจกใสหนา 6 มม. และหน้าต่างกระจกสีเทาเข้มหนา 6 มม. โดยได้ทำการเปิดเครื่องปรับอากาศเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในห้องประมาณ 25 องศาเซลเซียส และกำหนดให้แบบจำลองของผู้อาศัยแต่งตัวแบบผู้ทำงานปกติ (office) (Clothing insulation = 0.5 clo) และมีการทำงานแบบนั่งทำงานในสำนักงาน (1.2 met (1 met = 58  $W/m^2$ )) หัววัดอุณหภูมิ operative จะถูกตั้งห่างจากหน้าต่างกระจกเป็นระยะ 0.2 เมตร และปรับเอียงทำมุมเพื่อจำลองสภาพคนนั่งหันด้านข้างเข้าสู่หน้าต่างกระจก คุณสมบัติเชิงแสงของหน้าต่างกระจกทั้งสองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่ากระจกใสจะมีค่าการส่งผ่านรังสีที่สูง ในขณะที่กระจกสีเทาเข้มนั้นมีค่าการส่งผ่านรังสีต่ำกว่ากระจกใส แต่จะมีค่าการดูดกลืนรังสีสูงกว่ากระจกใส

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงแสงของกระจก

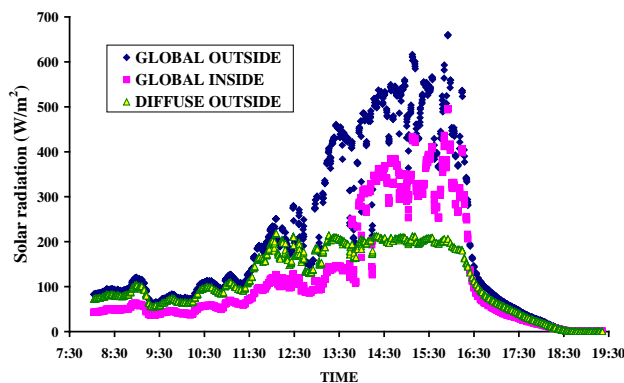
ชนิดกระจก	Visible t		Solar Energy		
	Trn	Ref	Trn	Ref	Ab
กระจกใส	89	8	80	8	12
กระจกสีชา	43	48	41	5	54

หมายเหตุ: Trn = transmittance, Ref = reflectance, Ab = absorptance

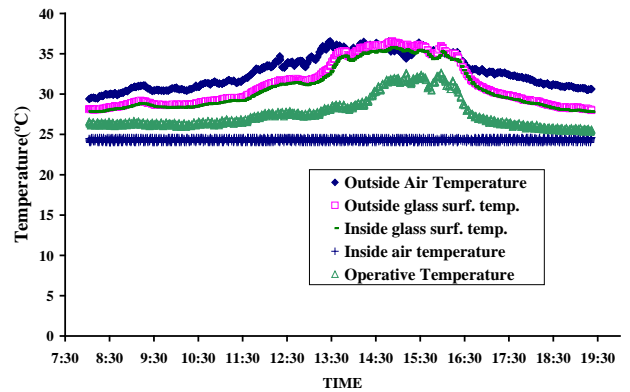


**4.1 ผลการทดลอง**

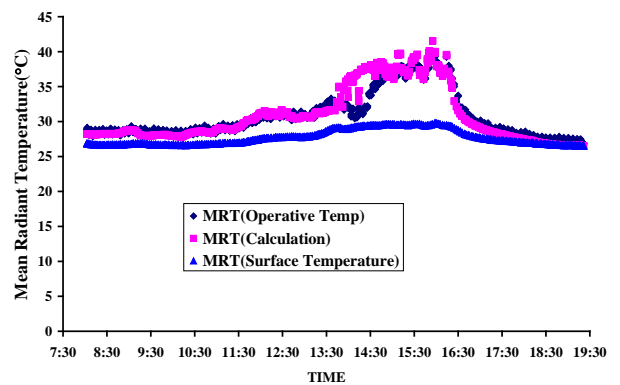
ในส่วนของการทดลองที่กระทำกับหน้าต่างกระจกใสนั้นจะกระทำในวันที่ 19 พฤษภาคม 2552 ข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการวัดจะถูกนำมาแสดงและข้อมูลบางส่วนจะถูกนำไปประมวลผลทั้งจากเครื่องประมวลผล ความสบายเชิงความร้อนและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รูปที่ 4 แสดงถึงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้าสู่ภายในห้องทดลอง รูปที่ 5 แสดงถึงอุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิอากาศภายใน อุณหภูมิผิวด้านในและด้านนอกของหน้าต่างกระจก และอุณหภูมิ operative จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งของค่าอุณหภูมิ operative มีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกับเส้นโค้งของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจก รูปที่ 6 แสดงถึงค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยจากผลของอุณหภูมิผิว และค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่รวมผลของรังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วยที่ได้จากการคำนวณ (สมการที่ 4 และ 5) ในรูปที่ 6 ยังแสดงค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่หาค่าได้จากการประมวลผลด้วยเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนจากข้อมูล ค่าอุณหภูมิ operative ที่วัดได้จากหัววัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4 ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกใสและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านกระจกใส

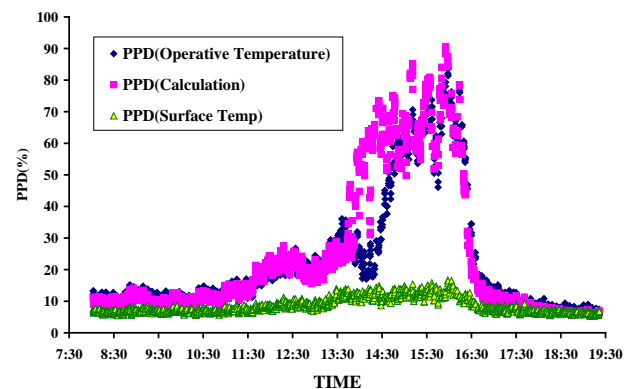


รูปที่ 5 ค่าอุณหภูมิอากาศภายในและภายนอก ค่าอุณหภูมิผิวกระจกและค่าอุณหภูมิ operative ของหน้าต่างกระจกใส



รูปที่ 6 ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของห้องที่ติดกระจกใส

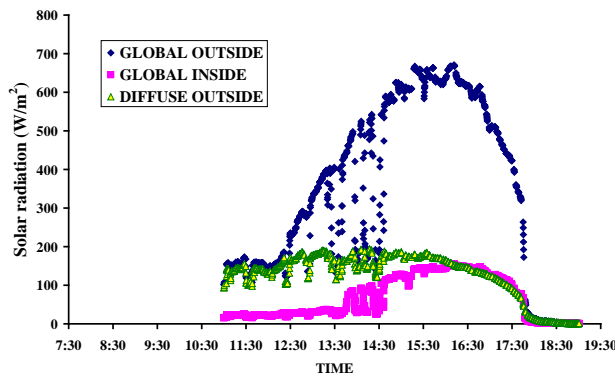
รูปที่ 7 แสดงถึงค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่า PPD จากเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อน



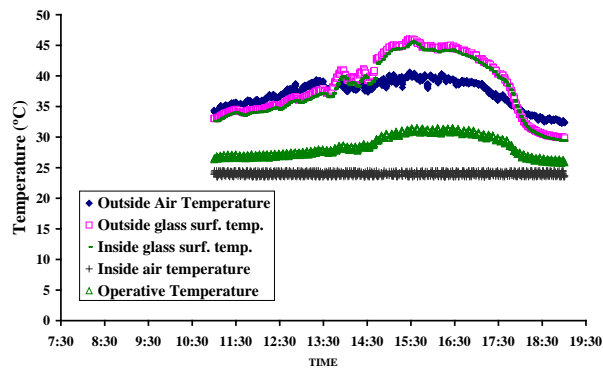
รูปที่ 7 ค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน PPD ของหน้าต่างกระจกใส

ในส่วนของการทดลองหน้าต่างกระจกใส การทดลองกระทำเช่นเดียวกับการทดลองของหน้าต่างกระจกใส โดยทำการวัดในวันที่ 8 พฤษภาคม 2552 รูปที่ 8 แสดงถึง

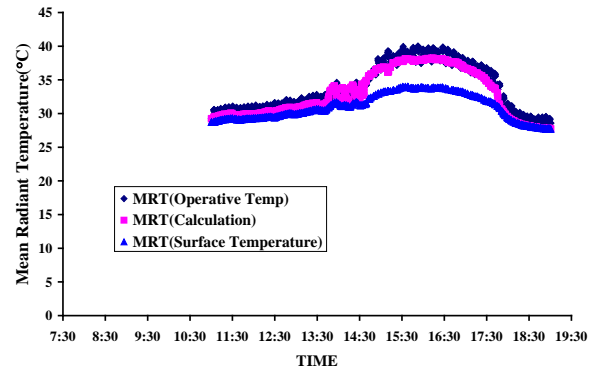
ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้าสู่ภายในห้องทดลอง รูปที่ 9 แสดงถึงอุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิอากาศภายใน อุณหภูมิผิวด้านในและด้านนอกของหน้าต่างกระจก และอุณหภูมิ operative รูปที่ 10 แสดงถึงค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยจากผลของอุณหภูมิผิว ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่รวมผลของรังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากค่าอุณหภูมิ operative รูปที่ 11 แสดงถึงค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่า PPD จากเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อน



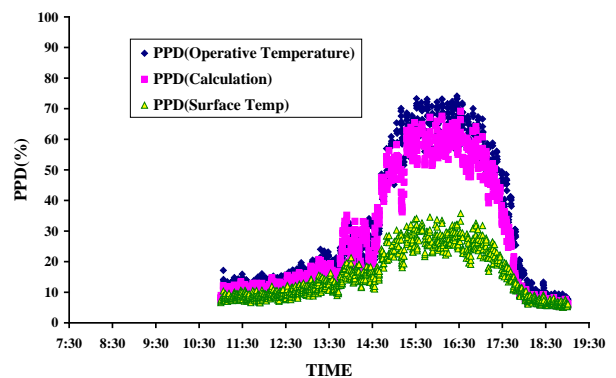
รูปที่ 8 ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก สีชาและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านกระจกสีชา



รูปที่ 9 ค่าอุณหภูมิอากาศภายในและภายนอก ค่าอุณหภูมิผิวกระจกและค่าอุณหภูมิ operative ของหน้าต่างกระจกสีชา



รูปที่ 10 ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของห้องที่ติดกระจกสีชา



รูปที่ 11 ค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน PPD ของหน้าต่างกระจกสีชา

#### 4.2 การวิเคราะห์

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกันในช่วงเช้า เนื่องจากหน้าต่างกระจกถูกติดตั้งให้หันหน้าไปทางทิศตะวันตก ดังนั้นในช่วงเช้าจะมีแต่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายตกกระทบหัววัด ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากการวัดจึงมีค่าเท่ากัน และจากการบังของขอบอาคารทำให้หน้าต่างกระจกเริ่มรับแดดในช่วงประมาณ 12.30 น. ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมมีค่าสูงขึ้น และจะเห็นได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านกระจกจะมีค่าตามหลังค่ารังสีที่ตกกระทบอยู่ประมาณ 2 ชั่วโมง เหตุผลก็คือตำแหน่งการติดตั้งของเครื่องรับรังสีแสงอาทิตย์ที่อยู่ภายนอกห้องนั้นจะรับแสงอาทิตย์ก่อนที่หน้าต่างกระจกจะได้รับเนื่องจากการบังของขอบอาคาร รูปที่ 6 แสดงถึงค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลค่าของอุณหภูมิ operative เปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิ

การแผ่รังสีเฉลี่ยรวมที่ได้จากการคำนวณ จะเห็นว่า สอดคล้องกันดี ยกเว้นช่วงเวลาประมาณ 14.00 ถึง 15.00 น. ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณจะสูงกว่าค่าที่ได้จากข้อมูลการวัด เหตุผลก็คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณ นั้นหาค่ามาจากการใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่ ตกกระทบบนเครื่องวัดมาคำนวณ ซึ่งในช่วงเวลา ดังกล่าวรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเครื่องวัดยังไม่ ตกกระทบบนกระจกเนื่องจากการบังของขอบอาคาร ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น แต่เมื่อรังสี แสงอาทิตย์ตกกระทบบนผิวกระจกแล้วค่าจะเริ่ม กลับมาสอดคล้องกัน และจะเห็นได้ว่าลักษณะการ แปรเปลี่ยนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยกับเวลาจะมี ลักษณะสอดคล้องกับการแปรเปลี่ยนของค่ารังสี แสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก ในขณะที่ในรูปแบบที่ 6 นั้นยังแสดงถึงค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยจากผล ของอุณหภูมิผิวที่ได้จากการคำนวณ รูปที่ 7 แสดง ถึงค่า PPD ที่ได้จากผลการประมวลผลจาก เครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนกับค่า PPD ที่ได้จากการคำนวณ (จากสมการที่ 1 และ 2) จะ เห็นว่าค่าทั้งสองมีแนวโน้มของความสัมพันธ์ สอดคล้องกันดี ยกเว้นช่วง 14.00 ถึง 15.00 ซึ่ง ความคลาดเคลื่อนมาจากค่าที่ได้จากการวัดกับค่าที่ ตกกระทบกระจกจริงไม่ตรงกันเนื่องจากการบังเงา ของขอบอาคารดังที่ได้อธิบายไว้ในเรื่องของค่า อุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยในรูปแบบที่ 6 และในรูปแบบยังแสดงถึง ค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวกระจกเพียง อย่างเดียว ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าดังกล่าวมีขนาดค่อนข้าง น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า PPD รวม และจะเห็นได้ ว่าถึงแม้อุณหภูมิอากาศภายในห้องจะมีค่าต่ำ (25 °C) แต่คนที่นั่งใกล้หน้าต่างกระจกจะรู้สึกไม่สบายมากขึ้น เมื่อมีแดดส่องผ่านกระจกกระทบตัวคนเป็นไปตามค่า PPD รวม สำหรับกระจกสีชา รูปที่ 8 9 10 และ 11 จะมีลักษณะแบบเดียวกับรูปที่ 4 5 6 และ 7 จะต่างกัน ตรงขนาดของค่าที่แสดงในรูปแบบ ในการทำการทดลอง กับกระจกสีชานั้น จะพบว่าในวันที่ทำการทดลองจะมี แดดค่อนข้างดีกว่าวันที่ทำการทดลองกับกระจกใส และจะเห็นได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านกระจก

สีชาเมื่อเทียบกับรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบจะมีค่า น้อยกว่าในกรณีของกระจกใสมาก ซึ่งสามารถอธิบาย ได้จากค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกซึ่งมีค่าต่างกัน ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 และเนื่องจากกระจกสีชามี ค่าการดูดกลืนรังสีสูงกว่ากระจกใส ทำให้ค่าอุณหภูมิ ผิวกระจกมีค่าสูงกว่าในกรณีของกระจกใส และมีค่าสูง กว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกมากในช่วง 14.30 ถึง 18.00 น. ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 9 ซึ่งจะส่งผลให้ค่า อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากอุณหภูมิผิวอย่าง เดียวและค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวกระจก เพียงอย่างเดียวนั้นมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับในกรณี ของกระจกใส ลักษณะของการแปรเปลี่ยนของค่า PPD รวมเทียบกับเวลาที่ได้จากเครื่องประมวลผล ความสบายเชิงความร้อนกับค่าที่ได้จากการคำนวณมี ความสอดคล้องกันดี แต่ค่าที่ได้จากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์นั้นมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวัดเล็กน้อย

## 5. สรุป

จากการทดลองจะพบว่าค่าอุณหภูมิการแผ่ รังสีเฉลี่ยมีผลโดยตรงต่อค่าดัชนีความสบายเชิงความ ร้อนในรูปแบบของ PPD และยังพบว่าคุณสมบัติเชิงแสง ของหน้าต่างกระจกมีผลโดยตรงต่อค่าดัชนีความสบาย เชิงความร้อน หน้าต่างกระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสีสูง จะมีค่า PPD จากผลของรังสีแสงอาทิตย์สูง และจะมี ค่า PPD จากผลของอุณหภูมิผิวค่อนข้างต่ำ ในขณะที่ หน้าต่างกระจกที่มีค่าการดูดกลืนรังสีสูง จะมีค่า PPD จากผลของอุณหภูมิผิวสูงตามค่าอุณหภูมิผิว ทำให้ ความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้ที่อยู่ใกล้กับหน้าต่าง กระจกต่างชนิดกันมีลักษณะแตกต่างกัน และจะ พบว่าค่าผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ ค่าที่ได้จากข้อมูลการวัดด้วยหัววัดเฉพาะมีแนวโน้ม สอดคล้องกันดี แต่ยังมีมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก ความแม่นยำของการวัด และข้อจำกัดของการติดตั้ง อุปกรณ์ รวมทั้งความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ ซึ่งต้องมีการศึกษาต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ



ผู้วิจัยขอขอบคุณในการสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้  
จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaiyapinunt, S., Phueakphongsuriya, B., Mongkornsaksit, K., Khomporn, N., (2005). Performance rating of glass windows and glass windows with films in aspect of thermal comfort and heat transmission. *Energy and Building*. 37, 7, 2005, pp. 725-738.
- [2] Chaiyapinunt, S. and Khamporn, N., (2009). Selecting glass window with film for building in a hot climate, *Engineering Journal*, vol. 13 issue 1, 2009, pp. 29-42.
- [3] ISO 7730, (1995). *Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*.
- [4] Fanger, P.O., (1970). *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York.
- [5] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (2001). *ASHRAE Handbook of Fundamental 2001*, pp. 30.13-30.17.
- [6] Fuller, R. A. (1991). Angular dependence of optical properties of homogeneous glasses. *ASHRAE Transactions* Vol. 97, Part 2, 1991, pp. 1129-1137.
- [7] *Thermal Comfort*, (2002). Bruel & Kjaer Innova Air Tech Instruments, Denmark.